

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Моисеева Александра Николаевича

на диссертационную работу Кочетковой Ирины Андреевны
на тему «Модели для анализа эффективности приоритетного доступа
в беспроводных сетях с эластичным и потоковым трафиком»,
представленную к защите в ПДС 0200.006 на базе
Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика

Актуальность темы

Диссертационная работа Кочетковой Ирины Андреевны «Модели для анализа эффективности приоритетного доступа в беспроводных сетях с эластичным и потоковым трафиком» направлена на решение фундаментальной научной проблемы на пересечении теоретической информатики, математической кибернетики и современных телекоммуникационных технологий. Актуальность темы обусловлена рядом ключевых факторов, определяющих развитие телекоммуникационной инфраструктуры на ближайшие десятилетия.

Стремительное развитие беспроводных сетей, направленное на внедрение технологий пятого (5G) и шестого (6G) поколений, сопровождается экспоненциальным увеличением разнообразия типов трафика и предоставляемых услуг. Классические методы управления ресурсами, ориентированные на однородные потоки данных, теряют свою эффективность в условиях одновременного обслуживания приложений с ультранизкими задержками, сервисов с высокой пропускной способностью и массовых соединений интернета вещей. Каждый из этих типов трафика предъявляет уникальные и часто противоречивые требования к пропускной способности, задержкам и надежности, что обуславливает необходимость разработки механизмов приоритизации для обеспечения гарантированного качества обслуживания (QoS).

Технологические концепции, такие как сетевая нарезка (network slicing) и совместное использование спектра (spectrum sharing), лежащие в основе гибкости и экономической эффективности сетей 5G/6G, требуют разработки принципиально новых математических моделей. Эти модели должны учитывать динамическое перераспределение ограниченных радиоресурсов между виртуальными операторами или классами услуг, а также учитывать конкурентные и внешние факторы. Существующие модели теории массового обслуживания и математической теории телетрафика не полностью охватывают специфику современных сценариев, включая гистерезисное управление, приостановление и возобновление сессий, а также зависимое использование разнотипных ресурсов (время, частота, мощность сигнала).

Использование миллиметрового диапазона (mmWave) для обеспечения высоких скоростей передачи данных связано с проблемой высокой чувствительности радиоканала к блокировкам, что вносит значительную неопределенность в работу системы и требует

учета на этапе проектирования и анализа эффективности. Аналогичные проблемы возникают при работе в нелицензируемых диапазонах, где мобильный трафик оператора конкурирует за ресурсы с сетями Wi-Fi.

Разработка комплексного математического аппарата для анализа и расчета показателей эффективности сложных схем приоритетного доступа в условиях совместного обслуживания эластичного и потокового трафика, а также учета ненадежности канала связи и динамического перераспределения ресурсов является актуальной научной задачей, имеющей важное народнохозяйственное значение. Диссертационное исследование И. А. Кочетковой направлено на решение этой задачи, что определяет его актуальность, и соответствует профилю специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика (по физико-математическим наукам).

Содержание диссертации

Диссертационная работа И.А. Кочетковой структурно состоит из введения, пяти глав основного содержания, заключения, списка литературы из 400 наименований.

Во введении дано развернутое обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Определены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современных проблем приоритетного доступа в беспроводных сетях. Центральным результатом главы является систематизация схем приоритетов обслуживания и дополнение нотации Кендалла – Башарина, позволяющее задавать приоритет для классов заявок, учитывать возможность снижения скорости, структуру и разные типы ресурса, влияние на систему внешних событий.

Во второй главе разработаны модели приоритетного доступа потокового трафика. Для узкополосной сверхнадежной передачи с малой задержкой и широкополосной связи разработан матричный алгоритм расчета стационарного распределения для системы с двумя орбитами. Получены формулы для расчета вероятности прерывания и средней скорости широкополосного трафика. Для одноадресного видео по требованию и многоадресной видеоконференции предложен рекуррентный алгоритм расчета стационарного распределения.

В третьей главе предложены модели приоритетного доступа эластичного трафика с требованием к минимальной скорости передачи. Для обслуживания трафика в нелицензируемых радиочастотах построена модель системы массового обслуживания с мультипликативным распределением вероятностей. Для нарезки радиоресурсов предложена модель управляемой системы массового обслуживания с перераспределением ресурса по сигналам.

В четвертой главе представлены разработанные автором модели обслуживания критически важных данных в миллиметровом диапазоне. Время недоступности миллиметрового диапазона моделируется временем отказа ненадежных приборов. Получены матричные алгоритмы расчета стационарного распределения и символьного вычисления преобразования Лапласа-Стилтьеса моментов времени передачи эластичного трафика по вложенной цепи Маркова.

В пятой главе завершено построение комплекса моделей совместного использования радиочастот с приоритетным доступом. Представлены разработанные рекуррентный алгоритм расчета среднего числа приостановленных сессий потокового трафика и матричный алгоритм символьного вычисления преобразования Лапласа-Стилтьеса периода занятости системы. Предложена модель управляемой системы массового обслуживания с гистерезисным управлением занятием ненадежных приборов и получен алгоритм расчета вероятности прерывания и средней скорости передачи трафика.

Достоверность и новизна результатов диссертации

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием строгого математического аппарата, корректным выбором математических методов, соответствием результатов поставленным задачам и апробацией на ведущих международных конференциях и в рецензируемых научных изданиях.

Научная новизна работы заключается в следующих результатах:

- 1 Разработан комплекс моделей приоритетного доступа, основанный на подходе к описанию схем приоритезации – введении матрицы приоритетов. В отличие от классических моделей с линейным порядком классов заявок, данный формализм позволяет задавать приоритет для каждой пары классов, учитывать снижение скорости, структуру и различные типы ресурса, а также влияние внешних событий.
- 2 Для потокового трафика предложены новые аналитические модели, учитывающие особенности совместного обслуживания узкополосного и широкополосного трафика. Научная новизна заключается в учете задержек на попытки возобновления передачи через механизм орбит и применении дискриминаторного разделения слота времени в ресурсной системе. Впервые реализована схема взаимного приоритета для одноадресного и многоадресного трафика с учетом двух режимов мультимедиа.
- 3 Для эластичного трафика разработаны новые механизмы приоритезации, включая реализацию приоритета через прерывание сессий с минимальной скоростью передачи. Модель с управляемым перераспределением ресурса на основе марковского процесса принятия решений позволяет оптимизировать политики управления в системах с сетевой нарезкой.
- 4 Созданы новые модели для систем с ненадежными ресурсами, учитывающие приоритетный доступ через приостановку сессий с размещением в конечной очереди и марковский входящий поток. Это расширяет класс исследуемых систем, ранее ограниченный надежными ресурсами и бесконечными очередями.
- 5 Разработаны новые эффективные алгоритмы анализа, включая скалярный алгоритм расчета среднего числа приостановленных сессий для потокового трафика. Для систем с частично ненадежным ресурсом предложена модель с

управляемым распределением нагрузки, учитывающая зависимое занятие различных типов ресурсов – мощности сигнала и слота времени.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научные положения и выводы диссертации характеризуются высокой степенью обоснованности. Разработанные модели и алгоритмы основаны на строгих математических методах, таких как теория марковских процессов, теория массового обслуживания и математическая теория телетрафика. Применение матрично-аналитических вычислений, теории марковских процессов принятия решений полностью соответствует поставленным задачам. Выбор параметров систем – параметров возобновления обслуживания, скорости передачи и интенсивностей сигнала контроллера – основан на анализе численных экспериментов.

Все положения работы согласованы и непротиворечивы. Выводы логически вытекают из анализа и корректно интерпретированы с учетом особенностей систем. Разработанные модели и методы отражают современные тенденции развития беспроводных сетей и учитывают актуальные требования качества обслуживания. Научные положения, выводы и рекомендации диссертации являются обоснованными и заслуживают доверия.

Ценность для науки и практики результатов работы

Теоретическая ценность результатов диссертации заключается в развитии математического аппарата теории массового обслуживания и телетрафика. Предложен комплексный подход к моделированию сложных систем приоритетного доступа на основе матрицы приоритетов, который расширяет классический аппарат нотации Кендалла. Разработанные марковские модели с орбитами, управляемые системы массового обслуживания и ресурсные модели с зависимым занятием разнотипных ресурсов представляют значительный интерес для развития аналитических методов исследования сложных систем.

Практическая ценность работы подтверждается непосредственной применимостью результатов для проектирования и оптимизации беспроводных сетей 5G/6G. Разработанные модели и алгоритмы позволяют проводить количественную оценку показателей качества обслуживания в различных сценариях сетевого планирования; оптимизировать параметры систем приоритетного доступа в реальных условиях; выбирать рациональные политики управления ресурсами при сетевой нарезке; определять режимы работы в миллиметровом диапазоне и при совместном использовании радиочастот.

Результаты нашли практическое применение в научно-исследовательских проектах и учебном процессе, подтверждая их востребованность и реализуемость. Предложенные подходы могут использоваться при проектировании перспективных беспроводных сетей операторами связи и производителями телекоммуникационного оборудования.

Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати

Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах, что подтверждает их достоверность и соответствие современным научным стандартам. Автор имеет 55 научных публикаций, среди которых 31 статья в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, 12 статей в российских журналах, индексируемых в RSCI, 1 статья в журнале из перечня ВАК, 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ, 2 монографии, 1 учебно-методическое пособие и 1 статья в трудах конференции.

Наиболее значимые результаты опубликованы в ведущих международных журналах, таких как Mathematics (Q1 в Scopus), Future Internet (Q2 в Scopus), Journal of Sensor and Actuator Networks (Q2 в Scopus), IEEE Access (Q1 в Scopus) и Automation and Remote Control. Эти публикации отражают ключевые положения диссертации.

Работы автора также опубликованы в сотрудничестве с зарубежными учеными из Чехии, Финляндии и других стран, что свидетельствует о международном признании его исследований. Разработанные алгоритмы и методы защищены 7 свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ, что подчеркивает их практическую значимость и возможность реализации.

Соответствие содержания автореферата основным положениям диссертации

Автореферат адекватно и полно отражает основное содержание диссертационной работы. В нем идентично тексту диссертации сформулированы цель и задачи исследования, полностью соответствуют содержанию работы пять элементов научной новизны, а положения, выносимые на защиту, корректно отражают основные научные результаты.

Композиция автореферата логически следует структуре диссертации. Общая характеристика работы соответствует введению, описание основного содержания по главам точно отражает материал глав 1–5, а заключительная часть автореферата адекватно представляет выводы диссертации. Все математические модели, формулы, алгоритмы и методы расчета, приведенные в автореферате, соответствуют диссертации и представлены без искажений. Теоретические положения и выводы также сформулированы адекватно.

В автореферате корректно отражены разработанный комплекс моделей приоритетного доступа, предложенные алгоритмы анализа и расчета показателей эффективности, а также результаты апробации и практической реализации. Объем информации в автореферате достаточен для понимания сущности выполненных исследований, научной новизны и значимости работы, а также основных теоретических и практических результатов.

Таким образом, автореферат полностью соответствует содержанию диссертационной работы, достоверно отражает полученные научные результаты и обеспечивает возможность объективной оценки вклада соискателя в развитие науки.

Замечания по работе

- 1 Предложенный в главе 1 матричный формализм приоритетов эффективно примен для систем с двумя типами ресурсов. Однако неясны возможности его масштабирования – обобщения на случай трех и более типов ресурсов.
- 2 Диссертация могла бы только выиграть, если бы в каждом разделе глав 2–5 при переходе от системной модели к математической приводились бы пояснения того, почему математическая модель строится именно таким образом. Например, это можно было бы сделать, описав обоснование выбора элементов матрицы интенсивностей переходов Q .
- 3 В главах 3 и 5 представлены алгоритмы расчета стационарных характеристик. Однако отсутствует анализ их поведения при увеличении размерности системы. В частности, для матричного алгоритма из раздела 3.4 не исследована скорость сходимости при увеличении числа классов трафика и объема ресурсов. Это касается и некоторых других разделов диссертации.
- 4 В главе 4, посвященной моделям с МАР-потоками, недостаточно полно исследовано влияние корреляции во входящих потоках на показатели приоритетного доступа. Например, можно было бы сделать сравнение с пуассоновскими потоками в аналогичных условиях, что позволило бы количественно оценить влияние корреляции на ключевые показатели эффективности систем.
- 5 При анализе модели с гистерезисным управлением и частичным отказом ресурсов, представленном в главе 5, не приведено доказательство эргодичности соответствующего марковского процесса, что является важным аспектом для подтверждения математической корректности.
- 6 В работе также неюольшое число опечаток и стилистических погрешностей.

Приведенные замечания не снижают научную ценность результатов диссертационной работы и не влияют на ее положительную оценку.

Заключение

Диссертационное исследование Кочетковой Ирины Андреевны является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение научной проблемы разработки моделей и методов для анализа эффективности приоритетного доступа в беспроводных сетях связи с эластичным и потоковым трафиком, имеющей важное значение для реализации современных технологий беспроводной связи. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, согласно п. 2.1 раздела II Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы

народов имени Патриса Лумумбы», утвержденного ученым советом РУДН протокол № УС-1 от 22.01.2024 г., а ее автор, Кочеткова Ирина Андреевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика.

Официальный оппонент, Моисеев Александр Николаевич, доктор физико-математических наук (05.13.18 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций), доцент, заведующий кафедрой программной инженерии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», тел.: +7 (3822) 529-496, e-mail: moiseev.tsu@gmail.com.

15 октября 2025 г.



Е.В. Луков

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ УС ТГУ

Моисеев Александр Николаевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»

Адрес: 634050 Томская обл., Томск, просп. Ленина, д. 36

Тел.: +7 (3822) 529-585. E-mail: rector@tsu.ru

Страница в интернете: <https://tsu.ru>